

# 曲面画像平面化処理における立体形状推定誤差に対する 画像情報認識の精度検証

An accuracy verification of image information recognition  
on image planalization from distorted images on a curved surface  
for the estimated position error of 3D shape measurement

花瀬 貴美<sup>†</sup>  
Takami Hanase

矢野 良和<sup>†</sup>  
Yoshikazu Yano

**Abstract** Image information to be obtained from the target in real world may be distorted because they are on the curved surface. Existing techniques of image processing are designed for planar images, and are not suitable for distorted images. To apply existing techniques for distorted images, planation methods are desired. These methods need 3D structure information to be stretched into plain surface, but estimated 3D information obtained by structure measurement tools such as stereo vision or SfM(structure from motion) are represented with low resolution. In order to obtain planared image using low resolution 3D information, we proposed grid expansion technique with two sampled grids of different phases. Experimental results showed the effectiveness of our proposed method.

## 1 はじめに

近年スマートフォンなどのカメラデバイスが急速に普及している。それに伴い、アプリケーションを介して物体表面の文字情報や図形を画像認識により取得する技術が広く利用されるようになった。多くの画像認識手法は、情報が平らな面上にあることを前提とした処理を行う。しかし生活環境において情報が湾曲した形状上に存在する場合がある。例えば道路表示や街頭広告、商品ラベル、書籍などが挙げられる。湾曲した形状上の情報に、直線検出や OCR (光学文字認識), QR コードの読み取り処理を行うと、認識精度の低下だけでなく認識自体が困難になると考えられる。つまり曲面上の情報から既存の画像認識手法を行うことは難しい。既存の画像認識手法を適用可能にするために、曲面上の情報を平面形上に変換することが必要である。

従来の平面化手法には、大きく分けて次のものがある。ステレオ計測や三次元計測に基づく手法 [1], Shape

from shading の原理に基づく手法 [2], モデルフィッティングに基づく手法 [3][4], カメラ運動と対象形状復元に基づく手法 [5] である。これらの既存研究は対象とする物体、対象の撮影位置や照明条件の限定を前提とすることで、対象の高精度な 3 次元立体形状を取得する。高精度な立体形状をもとに曲面歪みの平面補正を実現してきた。一方、スマートフォンを用いる場合は生活環境から情報を取得するため、対象や撮影環境を限定することができない。対象や撮影環境を限定できない場合、立体形状の推定には多くの誤差が生じる。誤差によって、平面化画像の品質が低下することが考えられる。そこで本研究では、曲面平面化処理における立体形状推定誤差を補正し、平面化画像の情報精度を向上させる手法を提案する。

## 2 提案手法

曲面平面化処理の手法について述べる。曲面形状の平面化処理によって、曲面上の情報を平面画像として取り出すことができる。平面として画像情報が入手できれば既存の画像認識手法が適用できる。

<sup>†</sup> 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

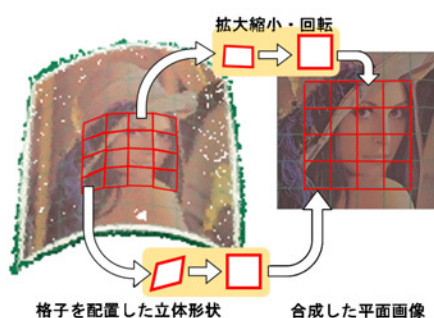


図 1 曲面平面化手法

曲面形状の平面化処理手法は以下の手順からなる．まず対象物体を 3 次元形状計測して画像曲面形状を抽出する．取得した曲面形状上に格子を配置して，曲面を小領域に分割する．この小領域は曲面形状の局所領域であるため，平面とみなすことができる．最後に小領域の形状を正面で見たときの形状になるよう正方変形をし，すべてを同一の平面上に配置できるように変換処理を実行する．以上の手順により，曲面平面化画像を取得する．

## 2.1 立体形状データを用いた平面化処理

平面化処理において，曲面形状上の画像情報を立体形状で取得した場合の処理を説明する．曲面形状情報を取得する手法として，立体形状計測を用いる．三次元形状計測データは Structure from Motion (SfM) [5] の手法によって取得する．SfM とは，対象の多視点画像群を複数枚用意し，それらから対象の立体形状とカメラ位置を推定する手法である．

次に曲面上に格子を定義する．曲面上の局所小領域は平面とみなすことができる．形状推定により得られた立体形状の点群情報に対し，等間隔な座標点群を抽出して格子を配置する．曲面上の各領域が正方形形状になるように分割したため，対象は正方形形状の集合体となる．各領域ごとに画像変換処理を行って平面化を実現する．

格子を配置した曲面立体形状を平面化する方法を図 1 に示す．立体形状に配置した格子の各領域を，2 次元正方形に画像変形する．画像変形には透視投影変換を用いる．画像変形によって，空間的に正方形形状である領域を正面から見たような形に変換できる．2 次元正方形を同一平面上に整列配置することで平面化画像を取得する．

## 2.2 透視投影変換

平面化手法では，主に透視投影変換処理を使用する．透視投影変換により，3 次元の平面領域を任意の位置から観察したときの状態に形状変換できる．よって立体形



図 2 曲面撮影画像から取得した格子点

状上の格子状の小領域を正面から観測した状態の正方形に変換して 2 次元平面上に配置する．透視投影変換は，式 (1) のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = P_m \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

変換前の座標を  $(x, y, z)$ ，変換後の座標を  $(x', y', z')$  とする． $P_m$  は  $4 \times 4$  の行列で表す透視投影変換のパラメータである．行列  $P_m$  の導出については紙面の都合で省略するが，導出の詳細については参考文献 [6] の第 2 章と第 3 章を参照して欲しい．

## 2.3 立体形状計測を用いない曲面推定と平面化処理

前節では，曲面の立体形状から平面化処理を行う方法の概要を説明した．しかし，曲面形状の曲率は一定でないため，立体形状に正確に正方格子を配置することは困難である．そこで本研究では，立体形状計測の簡単化を行った．平面画像に予め正方格子を描いておき，その印刷物を曲面形状にする．格子点座標は曲面を撮影した画像上の点として取り出す．以下で具体的に説明する．

図 2 は，Lenna 画像に予め格子を描いたものを用意し，それを印刷したものを曲面として曲げた様子を撮影した画像である．図中の格子形状はもとの平面では正方格子として描かれていたが，印刷物を曲面形状にしたため形が歪んでいる．これは 3 次元形状情報が撮影により 2 次元平面に射影されていることによる．射影された画像を正しい 2 次元形状に戻すことで，前節で示した平面化処理と等価の処理にすることができる．ここでは，歪んだ格子の各頂点を正しい正方格子の頂点位置に変形することで平面化を実現する．

画像上の格子点取得について説明する．撮影した画像上の格子点位置は画像処理により得ることも可能と考える．それら処理の実装の手間を省くため，今回は手作業により曲面画像からすべての格子点位置を指示し，座標

# 曲面画像平面化処理における立体形状推定誤差による画像情報認識の精度検証

を得た．得られた格子点情報を，合わせて図 2 上に赤点で描画した．

立体形状計測の簡単化手法では，手動で格子点座標を取得している．計測過程において実座標との誤差が避けられない．一方で，SfM による立体形状計測においても立体形状推定誤差が発生する．手動による取得誤差と立体形状推定誤差はどちらも座標値の誤差であり類似した特性を示す．手動による取得誤差と立体形状推定誤差にて明確な差異がないと考え，これ以降は簡単化した手法による平面化処理を行う．

## 2.4 射影変換

立体形状による平面化では，3 次元から 2 次元の変換が必要であった．曲面画像データによる平面化では，歪みを持つ 2 次元の格子点を正格子となる 2 次元の点になるよう平面を变形すればよい．この变形には射影変換を用いる．

図 2 に示した格子点のうち 1 つの格子を構成する領域をそれぞれ局所平面とする．局所平面の頂点となる 4 点を選択し，対応する 4 点の変換後座標を指定することで射影変換に必要な変換行列を決定できる．射影変換により局所平面は領域を正面から見た正形状に変形される．

変換前の座標を  $(x, y)$ ，変換後の座標を  $(u, v)$  とする．このとき射影変換は，式 (2),(3) と表すことができ，行列式としては式 (4) のように表現できる．

$$u = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + 1} \quad (2)$$

$$v = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + 1} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H_m \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$H_m$  は  $3 \times 3$  の行列で表す射影変換のパラメータである． $H_m$  によって画像の移動や回転，拡大，縮小が表現される．射影変換行列  $H_m$  を式 (5) に示す．

$$H_m = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$H_m$  は 8 つのパラメータを持つ．変換前後の 4 点の座標を式 (4) に当てはめ，8 元 1 次連立方程式を解くことで射影変換行列  $H_m$  を決定する．

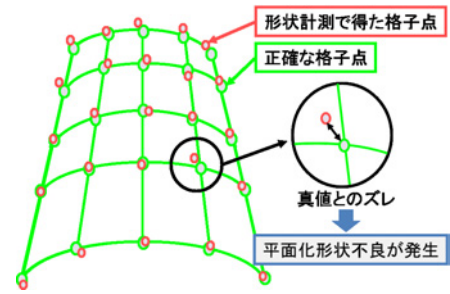


図 3 立体形状推定誤差

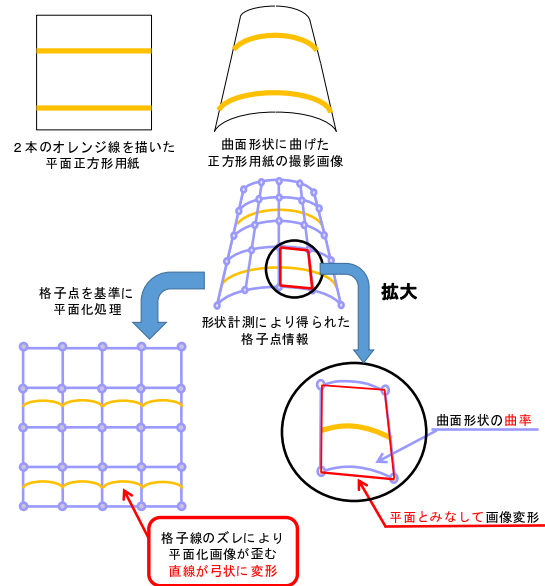


図 4 曲面への射影変換による変形誤差

## 2.5 曲面形状平面化処理における問題点

平面化処理では 2 つの問題がある．この問題点により，平面化処理結果に不具合が生じる．

一つ目の問題点は，カメラ撮影画像から取得した立体形状の精度が十分でないことである．SfM で取得した立体形状の座標情報にはノイズや誤差が含まれる．この誤差を立体形状推定誤差と呼ぶ．立体形状推定誤差を含んだ立体形状から格子点を抽出した場合，図 3 のように小領域の頂点情報に誤差が生じ，真値とのズレが発生する．真値と異なる点による変換のため平面化画像に歪みが生じ，平面化の品質が低下する．2.3 で述べた形状取得においても類似した問題が発生する．簡易化した形状計測における格子点取得は手動で行う．手作業で格子点の抽出を行うため，真値を中心とした正規分布として誤差を含む．これより手動取得誤差は立体形状推定誤差と等価であるとして扱う．同様に，誤差を含んだ状態で平面化を行えば，歪みや不連続な領域が発生してしまう．

二つ目の問題点は画像変形時の変換形状の相異によって生じる歪みである．平面化手法の概略を図 4 に示す．



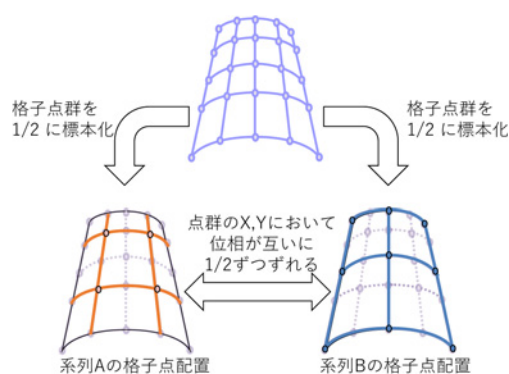


図 5 2 系列の格子配置

2 本のオレンジ線が描かれた平面正方形用紙を用意し、用紙を曲面形状に曲げて撮影した画像を対象とする。ここで透視投影変換などの画像変形を行う前の格子の局所領域に着目する。曲面形状上の格子を結ぶ線は、曲率にあわせて曲線を描く。一方、格子領域内を平面とみなすため画像変形の対象となる四角形は格子点間が直線で結ばれる。格子点間の結線が一方は曲線であり、もう一方は直線である差異が生じる。この違いにより曲面上の直線情報が弓状に変形した形になるように画像変形されてしまう。平面化画像が歪むと画像情報が精度よく取得できないため、歪みを補正する必要がある。

### 3 誤差を持つ立体形状情報による平面化手法の提案

#### 3.1 異なる格子系列による画像間の評価

誤差を含む立体形状をもとにした形状推定誤差の補正手法について提案する。まず図 5 に示すように、得られた格子点群から 2 系列の格子点群をリサンプルする。それぞれの系列では格子点の配置が位相が異なるように、縦横それぞれ 1/2 ずれて重なるようにした。このときそれぞれの系列の小領域内の連続性は、他方の不連続な接合部と対になる。よって一方の格子境界における不連続部の歪みを、他方の連続性のある格子領域の画像によって評価することができる。取得した立体形状のみを用いた自己補正が可能となる。

図 5 より平面化に用いる格子の頂点座標のうち、格子をひとつ飛びにサンプリングしたものを系列 A、系列 A に対し位相を  $x, y$  方向に 1/2 ずらしたものを系列 B とする。

図 4 と同様に、直線を描いた画像の曲面形状画像の平面化を例に考える。図 6 より系列 A の平面化画像 (a) と系列 B の平面化画像 (c) に注目する。図中の黒線で囲った領域において、(c) の領域は一つの画像変形の変換行列による処理で得た形状であるので、領域内部の情

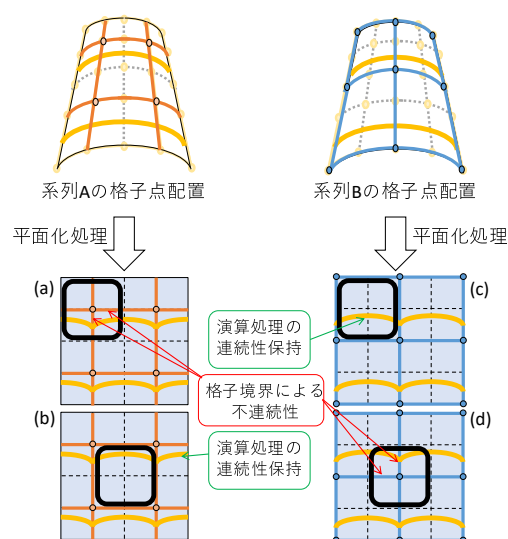


図 6 座標補正の考え方

報の連続性が保証される。一方 (a) では、(c) と同一位置に表現される黒線領域内で格子間の接合部を含む。格子の接合部は、隣接する局所領域をそれぞれ異なる変換行列によって変形した画像の合成により構成される。格子間で連続性が維持されず、変換前の曲面画像上にはない画像特徴が生じる。

次に図 6(b),(d) の場合について考える。この例では黒線領域内において系列 B による (d) の領域で不連続を有し、系列 A による (d) では同一変換により連続性を維持する。このようにある系列における不連続領域は、もう一方の系列にて連続性の維持された変換が実現される。

このような相補関係にある 2 系列の変換画像を用いて画像修正を試みる。2 つの変換画像の連結線をふくむ不連続画像領域には、その内部に格子点を含む。この格子点位置をずらして変形を行い、相補関係にある連続画像領域と比較検証する。以上のように、単一の格子点情報から位相の異なる 2 つの系列を取得することで、自己データのみでの評価と補正が可能となる。

#### 3.2 座標補正手法

提案する座標補正手法について述べる。図 6(a) の格子の座標を微小変化させて、図 6(c) との差分を評価する。領域内で連続性が維持された (c) と境界をもつ更新後 (a) の類似性が高くなれば、不連続性が解消されることを意味する。(a) と (c) の差分を計算することで類似性評価を行う。補正結果の概略図を図 7 に示す。図 4 と同様に、オレンジ線が描かれた曲面用紙の平面化を例にする。黒い実線で囲まれた領域では、系列 B によって座標補正をして平面化した状態が系列 A の黒実線領域に

# 曲面画像平面化処理における立体形状推定誤差による画像情報認識の精度検証

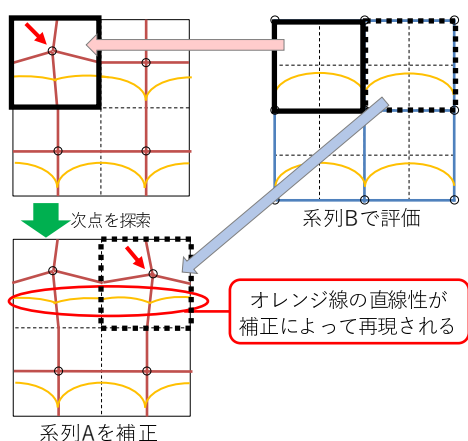


図7 座標補正による直線性の再現

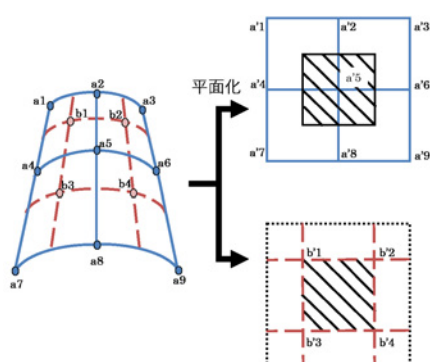


図8 座標補正手法

再現されている。補正前は弓状だったオレンジ線が元の形状に近づいている。同様に黒い点線領域もオレンジ線の形状が補正されている。これを系列Aの座標全体で行うことで、形状不良の改善が見込まれる。

ある4つの隣接格子領域の格子間で情報の連続性が保たれる座標を推定する手順について詳しく述べる。探索の処理手法を示した図を図8に示す。図8より、 $a_1 \sim a_9$ の格子群が系列A、系列Aを1/2ずらした $b_1 \sim b_4$ の格子群が系列Bとなる。まず系列Aの全頂点 $a_1 \sim a_9$ の最適化処理を行う。座標値の微小変化により得た $a_n$ の値を使って局所的な平面化を行い、系列Bの同一領域との差を求める。このとき指定範囲内の全座標について探索を行い、差の最小値を得た座標を新しい座標とする。次に、最適化された系列Aの座標値による平面化画像と系列Bの画像との差分値を計算する。頂点 $a_5$ の座標更新を行った場合、頂点 $a'_5$ 周囲の斜線領域と頂点 $b'_1 \sim b'_4$ で構成される斜線領域の差分を求める。差分値が収束していれば処理を終了する。収束していない場合、系列Bの頂点の最適化処理および差分値の収束確認を同様に行う。以上の処理を差分値の収束を得るまで繰り返し処理

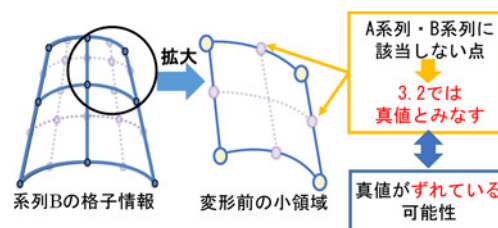


図9 格子点系列A,Bに該当しない座標

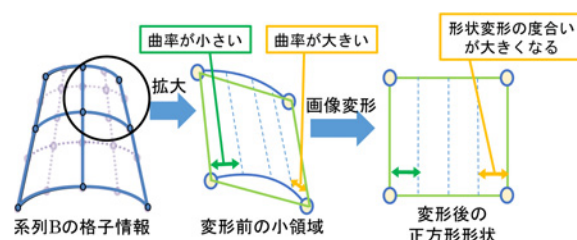


図10 小領域内での変形量の違い

を実行し、互いの接合部を相互的に評価して近づけることで、徐々に接合部の連続性が強くなる。収束時の座標を用いて平面化することで、立体形状推定誤差の補正が実現できる。

## 3.3 格子のバイアス調整

前述までの誤差補正において系列A・系列Bの格子点を用いた補正手法を提案した。ここで3.2で説明した格子系列A,Bにおいて、図9のようにどちらの系列にも該当しない点があることを考える。系列A,Bの格子は位相を1/2ずらして配置しており、それぞれ元の格子点の1/4の点数に相当する格子点数をもつ。つまり元の格子点のうち1/2の点が両系列から除外される。誤差補正手法では除外された点を真値として処理を行っていた。しかし、これらの点が真値とずれている可能性がある。よって誤差補正手法適用前に除外点を真値に近づける調整を行う必要がある。

また小領域内においても調整が必要な箇所がある。図10より、小領域内において曲率は変化することを図示した。小領域の横幅を曲線に沿って4等分したとき、右端領域は曲率が大きくなる。曲率が大きい部分は、画像変形後の形状が大きく引き伸ばされる。前項までの画像変形は、このような格子内の曲率の変化を無視して一括で行っていた。バイアス調整は、対象が曲がる方向に関係する。本研究では、カメラに対して正面側に曲面が見える形状を対象としているため、水平方向の調整を行う。調整の様子を図11に示す。誤差補正前の系列Aの格子点と系列Bの格子点を調整する。系列Aの格子点を一列ずつまとめて調整する。このとき両系列に含まれない点でも同列上にあれば合わせて調整する。調整範囲

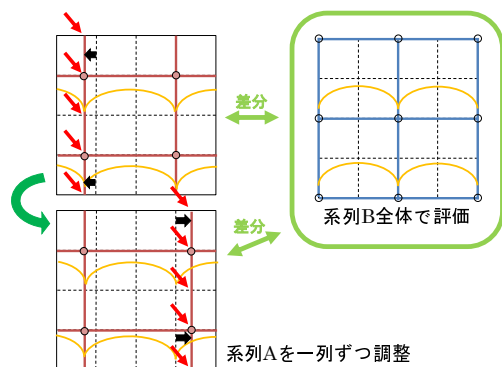


図 11 格子のバイアス調整

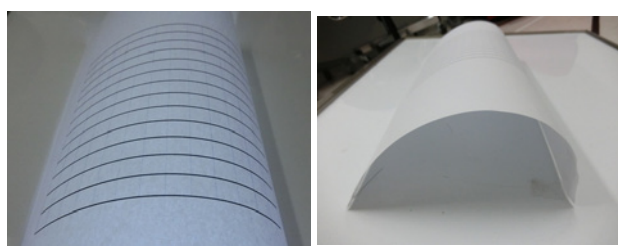
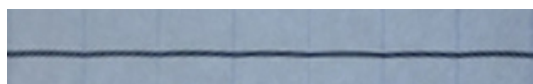
図 12 入力画像  
(a) 曲面撮影画像 (b) 曲面画像の曲率

図 13 全格子による平面化画像

内で, 系列 B の平面化画像との差分値が最小となる座標に列をまとめて移動させる. このバイアス調整によって, 系列に含まれない点をより真値に近づけることができる. また小領域内の変形量の違いにも対応できるようになる.

#### 4 実験および考察

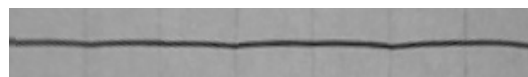
##### 4.1 直線性の再現検証

形状推定誤差補正手法の有効性を示すために実験を行う. 図 12(a) のように, 平面形上に直線が描かれた画像を曲面形状にし, カメラで撮影する. 曲率は図 12(b) のようになっている. 曲面撮影画像から格子点を取得し, 射影変換によって平面化処理を行う. 図 12(a) の平面化画像を図 13 に示す. 図 13 は差を見やすくするために拡大して表示している. 格子領域ごとに直線が変形し形状に歪みが生じていることがわかる.

次に誤差補正手法を適用する. この実験では, 直線形状が残るように画像を二値化し, 距離変換によって直線の変化を距離で表した. 距離変換画像の差分によって, 補正の評価・調整を行った. 誤差補正手法の適用結



(a) 補正手法適用前



(b) 補正手法適用後

図 14 誤差補正手法の適用結果

表 1 直線の再現検証結果

認識対象画像	近似直線の切片	標準偏差
平面化画像 (図 13)	24.5	0.52
手法適用前 (図 14(a))	18.2	1.32
手法適用後 (図 14(b))	19.4	0.65

果を図 14 に示す. 図 14(a) が誤差補正手法適用前, 図 14(b) が適用後の結果である. 補正前は形状が弓状に変形しているが, 補正手法の適用によって直線性が再現されていることがわかる. この結果を定量的に評価する. 図 13, 14 の線分が傾き 0 の直線と近似できるとして, その直線との標準偏差を算出する. 結果を表 1 に示す. 補正前後で標準偏差が減少することがわかった.

##### 4.2 OCR を用いた平面化画像の認識実験

提案する手法によって断面形状を推定し, 平面化を行う. 撮影にはデジタルカメラ (CASIO EXILIM EX-FC500S) を使用し, 画像サイズは  $640 \times 480$  pixel とした. 撮影画像から対象画像の格子点を取得する. 取得した格子点をもとに透視投影変換を行い, 平面化処理を行う. 各局所領域の大きさは対象領域を 14 等分するような大きさで設定した.

撮影で得られた図 15 に対し, 得られた平面画像の有用性を評価するため, OCR を適用した識字率評価を行う. 本稿では OCR として Google で公開されているオープンソース OCR エンジンである Tesseract-OCR を使用した. 評価の対象として, 平面の対象を撮影した画像を用意した. 平面の対象を撮影した画像は, 曲面展開を行っていないため, 提案手法での平面状態の再現に対する性能比較を行う対象とした.

評価の対象として用意した平面時の対象を撮影した画像を図 16 に示す. 形状推定誤差の補正検証を行うために, 補正前の画像を図 17, 補正後の画像を図 18 に示す. これらの画像から OCR によって識字した結果を図 19 に示す. OCR による識別結果を表 2 に示す.

図 15 の入力画像を OCR にかけて, 文字として認識されることがなかった. 文字情報が曲面歪みによって



曲面画像平面化処理における立体形状推定誤差による画像情報認識の精度検証

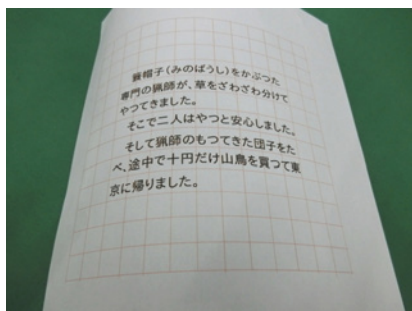


図 15 入力画像

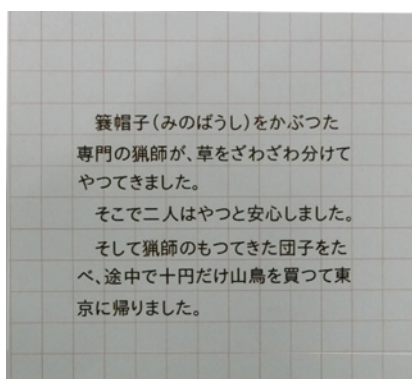


図 16 平面時の対象を撮影した画像

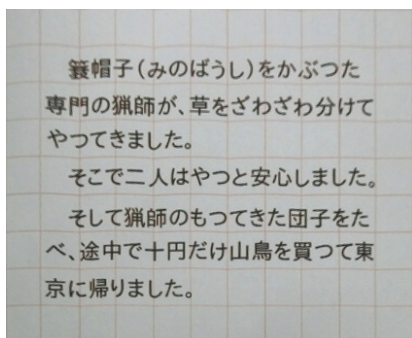


図 17 誤差補正手法の適用前の平面化画像

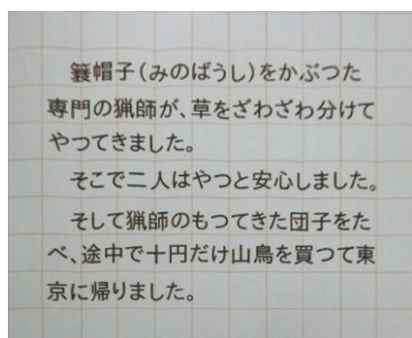


図 18 誤差補正手法の適用後の平面化画像

形状が変わると、文字認識ができないことがわかる。

理想的な平面状態である図 16 の識字結果 19(b) でも漢字など細かい文字で誤認識が発生していた。スキャナで取り込んだ画像と異なり、撮影による画像ではフォー

裏帽子（みのぼうし）をかぶった  
専門の猟師が、草をざわざわ分けて  
やってきました。  
そこで二人はやつと安心しました。  
そして猟師のもつてきた団子をた  
べ、途中で十円だけ山鳥を買って東  
京に帰りました。

(a) 正解のテキスト

裏帽子（みのぼうし）をかぶった  
専門の猟師が、草をざわざわ分けて  
やってきました。  
そこで二人はやつと安心しました。  
そして猟師のもつてきた団子をた  
べ、途中で十円だけ山鳥を買って東  
京に帰りました。

(b) 平面上の情報を撮影した画像

翼鞭子（みのぼうし）をかぶった  
薫門の猟師が、草をざわざわ分けて  
やってきました  
そこで二人はやつと安心しました。  
そして猟師のもつてきた団子をた  
べ、途中で十円だけ山鳥を翼つて翼  
京に帰りました

(c) 誤差補正手法の適用前の平面化画像

翼鞭子（みのぼうし）をかぶった  
薫門の猟師が、草をざわざわ分けて  
やってきました  
そこで二人はやつと安心しました。  
そして猟師のもつてきた団子をた  
べ、途中で十円だけ山鳥を翼つて翼  
京に帰りました

(d) 誤差補正手法の適用後の平面化画像

図 19 OCR でのテキスト化の結果  
(下線部は誤検出文字)

カスやレンズ歪み、撮影位置や光源変化などの要因で OCR に適した鮮明な画像を得ることが難しい。本実験ではこの結果を撮影による文字情報の取得における最良状態として扱い、以降の結果を判断する。誤差補正手法の適用前の平面化画の認識結果である図 19(c) をみると、89.9% の文字は正しく認識されていることがわかる。曲面上に存在する情報に比べ、およそ OCR で認識できる程度まで可読性が向上したことがいえる。誤差補正手法の適用後の平面化画の認識結果である図 19(d) での認識率は 91.4% だった。多少改善はしたが、図 17、

図 18 をみても目視ではあまり変化がみられなかった．また漢字部分の認識は補正前後ともに誤認識が多く起きていた．この実験ではひらがなが全体的に多く含まれていたため，認識率の底上げになっていたと思われる．

表 2 OCR の識字率

認識対象画像	識字率
平面对象を撮影した画像 (図 16)	96.8%
誤差補正手法適用前 (図 17)	89.2%
誤差補正手法適用後 (図 18)	91.4%

## 5 まとめ

平面化における形状推定誤差を改善するため，座標調整による補正手法を提案した．平面化を行った画像に対して提案する手法によって誤差補正精度の向上を行った．対象に描かれた線の直線性によって，歪み補正手法の有効性を示した．

提案した補正手法を適用する際，リサンプルした格子点は座標調整によって誤差を補正することができたが，操作対象でない座標については補正することができていない．今後，補正によって得た両系列の平面化画像を合成し，画像全体で補正することが必要となる．

## 参考文献

- [1] 天野敏之, 安部勉, 西川修, 伊與田哲男, 佐藤幸男: “アイスキャナによる湾曲ドキュメント撮影”, 信学

論誌 D-II, Vol.86, No.3, pp.409-417, 2003.

- [2] 浮田 浩行, 小西 克信, 和田 俊和, 松山 隆司: “固有空間法を用いた陰影情報からの書籍表面の 3 次元形状復元”, 信学論誌 D-II, Vol.83, No.12, pp.2610-2621, 2000.
- [3] Z.Zhang, C.L.Tan: “Correcting document image warping based on regression of curved text lines”, Document Analysis and Recognition, Proceedings. Seventh International Conference on. IEEE, 2003.
- [4] C.Wu, G.Agam: “Document image de-warping for text/graphics recognition”, SSPR2002, LNCS 2396, pp.348-357, 2002.
- [5] 満上育久: “Structure from Motion for Unordered Image Collections(私の研究開発ツール)”, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.4, pp.479-482, 2011.
- [6] 荒屋 真二, “明解 3 次元コンピュータグラフィックス”, 共立出版, 2003.

(受理 平成 29 年 3 月 10 日)